

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В СРЕДЕ MATLAB

Разработка математической модели исследуемой системы является первой задачей практически любого исследования. Еще совсем недавно создание моделей систем электроприводов начиналось многими исследователями «с нуля». Сегодня в помощь специалистам разработаны специализированные мощные пакеты моделирования, содержащие в своем составе как готовые элементы, так и уже собранные системы электроприводов различных типов.

Бесспорным лидером среди таких пакетов является MATLAB. В настоящей статье представлены методы моделирования весьма широко распространенных сегодня вентильных асинхронных электроприводов.

В общем случае можно выделить следующие задачи модельного анализа вентильных электроприводов с асинхронными машинами:

- Расчет статических и квазиустановившихся режимов работы. Эта задача не сопряжена с особыми сложностями, а математические модели легко поддаются программированию.

- Анализ динамических свойств систем, связанный с исследованием устойчивости, качества процессов, построением ЛЧХ и переходных функций. Анализ выполняется на основе линеаризованной модели системы «преобразователь – асинхронный двигатель».

- Моделирование переходных процессов. При моделировании процессов в системах электроприводов без учета преобразователей электрической энергии решается большинство задач, связанных с начальными этапами синтеза систем. Следует отметить, что во многих случаях этого анализа достаточно для получения достоверных результатов.

При исследовании динамических свойств систем как объекта регулирования обычно проводится анализ устойчивости и качества процессов регулирования, строятся и анализируются ЛЧХ. Поскольку системы электроприводов являются нелинейными, для их анализа применяют линеаризацию, в частности, разложением в ряд Тейлора. В качестве примера рассмотрим модель роторных цепей асинхронной машины:

$$\begin{aligned} p\psi_{rx} &= k_r r_r i_{sx} - \alpha_r \psi_{rx} + \omega_k \psi_{ry} - \omega \psi_{ry}; \\ p\psi_{ry} &= k_r r_r i_{sy} - \alpha_r \psi_{yx} - \omega_k \psi_{rx} + \omega \psi_{rx}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p$  – оператор дифференцирования;  $\psi_{rx}$ ,  $\psi_{ry}$  – проекции вектора потокосцепления ротора в свободно ориентированной вращающейся системе координат;  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  – проекции тока статора;  $\omega_k$ ,  $\omega$  – скорость вращения системы координат и угловая скорость ротора;  $k_r$ ,  $r_r$ ,  $\alpha_r$  – коэффициент связи, активное сопротивление и коэффициент затухания роторной обмотки соответственно [2].

В результате разложения в ряд Тейлора система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} p_{\Delta} \psi_{rx} &= k_r r_r \Delta i_{sx} - \alpha_r \Delta \psi_{rx} + \Delta \omega_k \psi_{ry}^0 + \omega_k^0 \Delta \psi_{ry} - \Delta \omega \psi_{ry}^0 - \omega_{\Delta}^0 \psi_{ry}; \\ p_{\Delta} \psi_{ry} &= k_r r_r \Delta i_{sy} - \alpha_r \Delta \psi_{ry} - \Delta \omega_k \psi_{rx}^0 - \omega_k^0 \Delta \psi_{rx} + \Delta \omega \psi_{rx}^0 + \omega_{\Delta}^0 \psi_{rx}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь символ  $\Delta$  указывает на приращение, а символ  $^0$  – на центр разложения в ряд соответствующей величины.

Полученная система легко преобразуется к матричной форме или форме пространства состояний:

$$\begin{aligned} pX &= AX + BU; \\ Y &= CX + DU, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$U = \begin{pmatrix} \Delta i_{sx} \\ \Delta i_{sy} \\ \Delta \omega_k \\ \Delta \omega \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} \Delta \psi_{rx} \\ \Delta \psi_{ry} \end{pmatrix}; Y = \begin{pmatrix} \Delta \psi_{rx} \\ \Delta \psi_{ry} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} -\alpha_r & \omega_k^0 - \omega^0 \\ -\omega_k^0 + \omega^0 & -\alpha_r \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} k_r r_r & 0 & \psi_{ry}^0 & -\psi_{ry}^0 \\ 0 & k_r r_r & -\psi_{rx}^0 & \psi_{rx}^0 \end{pmatrix}; \\ C &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для дальнейшего анализа линеаризованной системы (3) следует создать ее программную динамическую модель, воспользовавшись функцией `ss` (от англ. state space), которая принадлежит набору инструментов Control System Toolbox. Ее параметрами являются непосредственно матрицы (5). В нашем случае это будет выглядеть так:

$$\text{sys} = \text{ss}(A, B, C, D).$$

В результате будет создана структура, удобная для дальнейшей обработки средствами Control System Toolbox.

Для анализа свойств полученной динамической модели целесообразно воспользоваться функцией `ltiview(sys)`. Эта функция открывает окно интегратора Control System Toolbox, позволяющего воспользоваться разнообразными приемами анализа динамических моделей.

При анализе сложных систем, когда одни элементы могут быть описаны с помощью пространства состояний, а другие – с помощью передаточных функ-

ций, удобно воспользоваться функциями `append` и `connect`. Первая из них формирует общую динамическую модель, создавая единый блок уравнений, а вторая формирует сколь угодно сложные связи между отдельными блоками.

Важно отметить, что задачу объединения моделей решает автоматически пакет Simulink. Для этого в окне модели, состоящей из стандартных блоков, нужно открыть меню «Tools–Linear analysis...». При этом поступит предложение указать входы и выходы исследуемой системы. После этого в автоматически открывшемся окне LTI viewer следует выбрать меню «Simulink–Get Linearized Model». Однако использовать этот прием следует аккуратно, если в модели присутствуют нелинейные звенья, т.к. Simulink выполняет их линеаризацию самостоятельно.

Составление модели асинхронной машины в среде Simulink по различным традиционным вариантам ее уравнений [2,3] обычно не представляет сложности. Однако иначе обстоит дело при необходимости учета изменения параметров двигателя вследствие нагрева, эффекта вытеснения тока ротора, насыщения главной магнитной цепи.

Для решения данной задачи целесообразно включить в модель двигателя блок расчета параметров, выполненный на основе S-функции. S-функция позволяет создать сколь угодно сложный динамический объект, описываемый в общем случае нелинейными дифференциальными или разностными уравнениями. Использование встроенного языка программирования пакета MATLAB, либо внешних языков, например C, позволяет программировать правые части дифференциальных уравнений с любым необходимым набором промежуточных вычислений, в том числе и итерационных.

Приведенные выше способы анализа асинхронных электроприводов позволяют решать широкий круг задач, связанных с разработкой и исследованием данных систем электроприводов, и применимы как для научных, так и для обучающих целей.

- 
1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
  2. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988.
  3. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000.